УДК 621.313

МНОГОПОЛЮСНЫЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ВЕТРОУСТАНОВОК МАЛОЙ МОЩНОСТИ

А.И. Чучалин, И.А. Сафьянников, И.Н. Россамахин

Томский политехнический университет
E-mail: refer@tpu.ru

Описана конструкция многополюсного бесконтактного электрического генератора с электромагнитным возбуждением. Применение данного генератора позволит повысить эффективность работы ветроэнергетических установок. Дается объяснение конструкции и принципа действия генератора. Указаны отличительные признаки конструкции и ее положение в классификации электрических машин.

Введение

Интенсивное развитие электроэнергетики, основанной на использовании природных возобновляемых источников энергии, таких как вода и ветер, заставляет искать новые подходы в конструировании электромеханических преобразователей. В большинстве случаев это относится к ветроэнергетике, что обусловлено малой плотностью энергоносителя и нестабильностью его параметров (скорость ветра, влажность воздуха). Влияние этих факторов значительно снижает коэффициент преобразования энергии в ветроэнергетических установках (ВЭУ).

Одним из радикальных решений повышения эффективности работы ВЭУ является создание безредукторных установок, которые будут иметь повышенное КПД и надежность, а также низкую стоимость. Данное решение может быть реализовано при использовании специальных многополюсных конструкций электрических генераторов. Применение многополюсных электрических генераторов поз-

волит также создавать более эффективные варианты ВЭУ с тихоходными типами рабочих ветротурбин.

Необходимость более широкого применения тихоходных ветроустановок определяется особенностями структуры распределения на территории России значений среднегодовых скоростей ветра. Экономически эффективными для использования энергии ветра признаются районы со средней многолетней скоростью более 5 м/с [1, 2]. В основном это прибрежные районы и возвышенные местности. Данная оценка основана на возможностях и характеристиках наиболее распространенных типов ВЭУ имеющих в своем составе мультипликатор. Поэтому возможности по территориальному расширению применения ВЭУ необходимо, в первую очередь, связывать с развитием ветроустановок с безредукторной схемой соединения ветротурбины и генератора.

Основная часть

Анализ существующих разработок малооборотных машин позволяет выделить два основных подхода к решению поставленной задачи:

- уменьшение углового размера полюсного деления за счет применения магнитоэлектрической системы возбуждения [3–5];
- повышение относительной частоты вращения активных частей машины (биротативные конструкции) [6], где также предполагается использование постоянных магнитов.

Применение магнитоэлектрической системы позволяет создать генераторы с рабочими частотами вращения от десятков до сотен об/мин и обладает рядом преимуществ [3]. *Во-первых*, это отсутствие узла скользящих контактов, что значительно повышает долговечность и надежность работы генератора. *Во-вторых*, безобмоточная конструкция ротора более проста в изготовлении и как следствие обладает большей надежностью. *В-третьих*, исключение электрических потерь "на возбуждение" повышает КПД генератора.

Однако, необходимость обеспечения заданного уровня возбуждения на нижнем пределе диапазона рабочих частот вращения ветротурбины требует применения высококоэрцитивных магнитов из редкоземельных сплавов. По причине высокой стоимости таких магнитов повышается стоимость генератора и установки в целом. Недостатком магнитоэлектрической системы возбуждения является невозможность регулировки величины потока возбуждения, что приводит к необходимости применения более дорогостоящей силовой схемы стабилизации амплитуды генерируемого напряжения.

Кроме того, в существующих разработках чаще всего используется принцип построения активной зоны, присущий машинам синхронного типа. Характерной чертой такой активной зоны является последовательное расположение пар разноименных полюсов вдоль направления движения ротора (рис. 1). Это ограничивает минимальное значение межполюсного расстояния b_h и размер полюсного деления τ в целом. Т.о., использование синхронных машин для создания многополюсного генератора ограничивается особенностями самой конструкции.

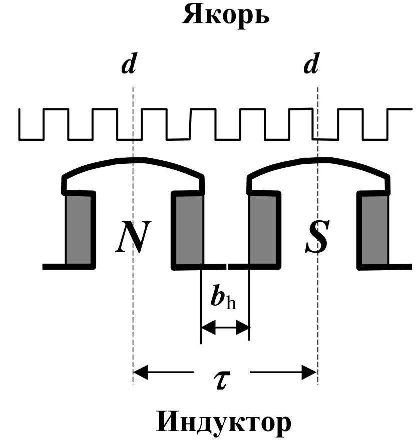


Рис. 1. *Схема активной зоны машин переменнополюсного типа*

Применение для этих целей схемы активной зоны машин с пульсирующим потоком позволяет заметно снизить величину полюсного деления τ (рис. 2). Индукторные одноименнополюсные машины имеют полюсную систему из однонаправлено намагниченных полюсов. Это позволяет использовать единую для всех полюсов сосредоточенную обмотку возбуждения и расположить ее на неподвижной части машины – статоре. Такое расположение обмотки не влияет на размеры самих зубцов (b_z) и зубцового деления (τ_z) и определяет бесконтактность машины с электромагнитным возбуждением. Кроме того, их однонаправленная намагниченность исключает явление межполюсных потоков рассеяния.

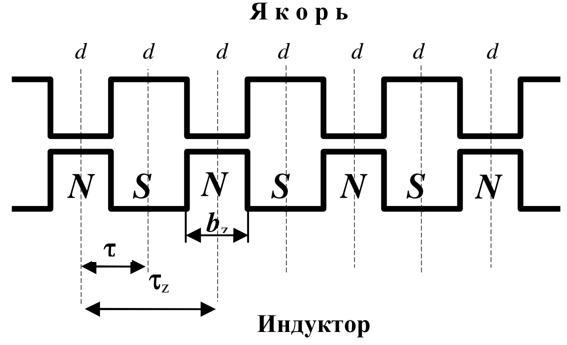


Рис. 2. *Схема активной зоны машин с пульсирующим потоком*

Основное распространение индукторные машины получили как высокочастотные источники питания. Использование их в качестве малооборотных генераторов промышленной частоты не нашло применение в основном по причине принципиально низкого коэффициента использования потока возбуждения $k_1 = (\Psi_{1af}^{max} - \Psi_{1af}^{min})/(2\Psi_{1af}^{max})$, значение которого не превышает 0,35...0,40 (рис. 3, кривая 1, где Ψ_{1af}^{max} и Ψ_{1af}^{min} максимальное и минимальное взаимное потокосцепление обмоток соответственно). Это определяет пониженный КПД машины и значение ее удельной мощности.

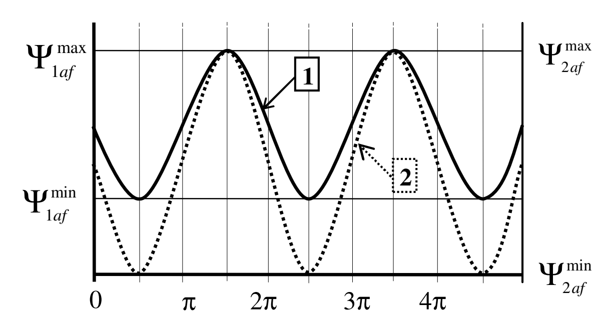


Рис. 3. *Закон изменения взаимного потокосцепления для: 1) индукторных одноименнополюсных машин; 2) многополюсных коммутаторных генераторов*

Другой разновидностью машин с пульсирующим потоком являются машины коммутаторного типа. В таких машинах используется принцип коммутации потока возбуждения, что позволяет повысить коэффициент использования *k*. Машины этого типа также имеют электромагнитную систему возбуждения и относятся к бесконтактным. Недостатком машин вышеупомянутого класса является пропорциональная связь размера полюсного деления с размерами обмоток якоря и возбуждения.

Конструкция генератора

Предлагаемая конструкция многополюсного генератора коммутаторного типа основана на синтезе конструктивных достоинств машин с пульсирующим потоком (рис. 4). Подобно индукторному одноименнополюсому генератору имеется неподвижная, единая для всех полюсов, обмотка возбуждения. Это позволяет значительно снизить размер полюсного деления и делает машину бесконтактной. Для изменения потока в воздушном зазоре применяется принцип коммутации потока возбуждения, что повышает по отношению к индукторным генераторам коэффициент использования магнитного потока. По принципу действия представленный генератор относится к машинам коммутаторного типа [7, 8].

На рис. 4 схематично представлена конструкция активной части генератора. Статор генератора состоит из трех блоков: центрального и двух крайних, отделенных от него через воздушные зазоры дисками ротора. Центральный блок статора является системой возбуждения генератора и содержит сосредоточенную обмотку – 1 с двумя группами охватывающих ее подковообразных пакетов магнитопровода – 2 и 3. Пакеты этих групп расположены поочередно-встречно друг другу. Якорь генератора состоит из двух магнитно- и электрически симметричных частей, которые смещены относительно друг друга на угловое расстояние, соответствующее одному полюсному делению. Так же как и блок системы возбуждения, каждая из частей якоря содержит сосредоточенную обмотку – 5 и охватывающие ее пакеты магнитопровода – 4. Обмотки обеих частей имеют электрическую связь. Пакеты на каждой из частей якоря ориентированы в одну сторону. Ротор генератора состоит из вала и двух немагнитных дисков – 6. Каждый из дисков имеет в своем составе пакеты магнитопровода – 7 и 8 двух разных направлений, выполняющие функцию переключателей контуров магнитного потока. Диски ротора по отношению друг к другу магнитно симметричны.

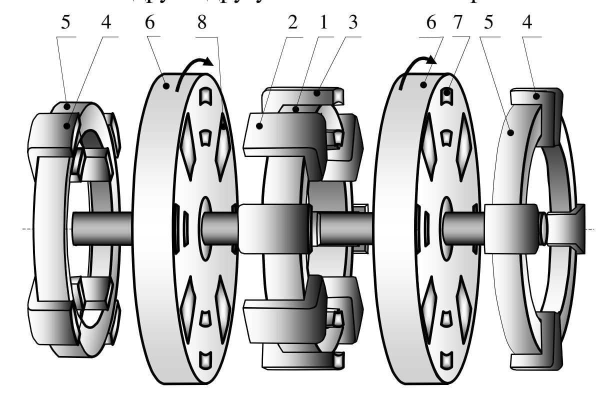


Рис. 4. *Активная часть многополюсного коммутаторного генератора дискового типа*

Особенностями представленной конструкции является аксиальное направление потока возбуждения в воздушном зазоре, сосредоточенный тип обмоток якоря и возбуждения и распределенный тип магнитной системы. Совокупность указанных отличий позволяет заметно снизить относительное значение полюсного деления τ и стоимость изготовления активной части. Это достигается упрощением технологии изготовления магнитопровода и обмоток. Магнитопровод выполняется по безотходной технологии навивкой ленты электротехнической стали. Изготовление сосредоточенной катушечной обмотки не требует сложного технологического оборудования.

Принцип действия генератора

Указанное на рис. 5, *а* взаимное положение пакетов магнитопровода – 1 и 2 на дисках *A* и *B* соответствует угловому положению ротора 0 эл. град. При этом постоянный магнитный поток Ψ_f, созданный обмоткой возбуждения W_f, образует одновременно два контура. Первый контур соответствует стороне роторного диска *B*, замыкаясь через "сквозные" пакеты – 1, охватывает левую обмотку якоря W_{aI}, обеспечивая тем самым максимальное значение взаимного потокосцепления обмотки возбуждения с обмоткой правой части якоря Ψ_{afI}. В тот же момент времени второй контур потока возбуждения, соответствующий стороне роторного диска *A*, замыкается сам на себя, минуя правую обмотку якоря W_{aII}, в результате действия шунтирующих пакетов – 2. Поток реакции этой части якоря Ψ_{aII} также шунтируется пакетами ротора – 2 и имеет свой обособленный от потока возбуждения путь. Таким образом, взаимное потокосцепление Ψ_{afII} обмотки возбуждения W_f и правой обмотки якоря W_{aII} равно нулю благодаря действию пакетов – 2 диска ротора *A*.

В следующий момент времени, когда угловое положение ротора, изображенное на рис. 5, *б*, равно 180 эл. град, потоки возбуждения Ψ_f на стороне диска *B* и реакции левой части якоря Ψ_{aI} шунтируются полюсами диска *B* и их взаимное потокосцепление Ψ_{afI} стано-

вится равным нулю. Контур потока возбуждения, соответствующий стороне диска *A*, наоборот замыкается через сквозные полюса диска и взаимное потокосцепление Ψ_{afII} обмотки возбуждения W_f и правой обмотки якоря W_{aII} возрастает до максимального значения.

Таким образом, эффект шунтирования магнитного поля возбуждения в многополюсном коммутаторном генераторе позволяет повысить значение коэффициента использования потока возбуждения $k_2 = (\Psi_{2af}^{max} - \Psi_{2af}^{min})/(2\Psi_{2af}^{max})$ до 0,5 по сравнению с индукторными машинами (рис. 3, кривая 2).

Для более детального анализа особенностей электромагнитных процессов, необходимо рассмотреть работу части генератора (половины обмотки возбуждения $\Psi_f/2$ и одной из обмоток якоря генератора W_{aI}), предварительно принимая в качестве закона изменения индуктивностей синусоиду. На рис. 6 приведены кривые изменения взаимной индуктивности обмотки якоря и обмотки возбуждения M_{afI} и собственной индуктивности обмотки якоря L_{aI} в функции от угла поворота ротора.

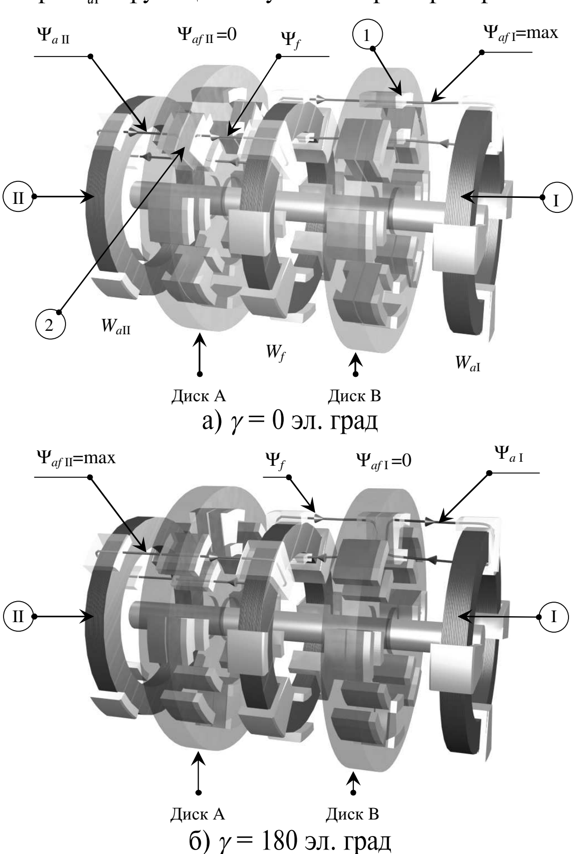


Рис. 5. *Принцип действия многополюсного коммутаторного генератора*

Процесс изменения взаимной индуктивности обмоток генератора M_{afI}, представленный на рисунке сплошной кривой, по характеру аналогичен изменению взаимной индуктивности обмоток в индукторном генераторе, т.е. взаимная индуктивность, изменяется по величине, не меняя при этом знака. Однако, в отличие от представленной машины, для машин индукторного типа является принципиальным отличное от нуля минимальное значение взаимной индуктивности. Это объясняется тем, что способ изменения потока в рассматриваемом генераторе основан на коммутации (изменении направления) посредством шунтирующего действия одного из пары полюсов ротора, что с точки зрения индукторной машины соответствует бесконечному сопротивлению увеличенного воздушного зазора. Изменение собственной индуктивности обмотки якоря генератора L_{aI}, обозначенной на рисунке пунктирной кривой, происходит в противофазе изменению взаимной индуктивности. Данное обстоятельство объясняется тем, что при угловом положении ротора, соответствующем максимальному взаимному потокосцеплению Ψ_{afI}=max между обмоткой якоря W_{aI} и обмоткой возбуждения W_f (рис. 5, *а*), контур магнитного потока четыре раза пересекает воздушный зазор, а при угловом положении ротора, соответствующем минимальному значению взаимного потокосцепления Ψ_{afI}=min=0 (рис. 5, *б*), – только два.

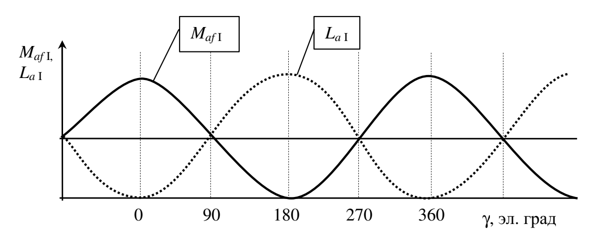


Рис. 6. *Кривые изменения взаимной индуктивности обмотки якоря и обмотки возбуждения M_{afI} и изменение собственной индуктивности обмотки якоря L_{aI} в зависимости от угла поворота ротора γ*

Для дальнейшего анализа принципа действия генератора необходимо рассмотреть его работу в полном составе. Электромагнитные процессы, происходящие в правой и левой частях генератора идентичны, но имеют друг относительно друга фазовый сдвиг на 180 эл. град (рис. 7). Кроме того, амплитуды взаимных индуктивностей обмоток каждой из частей генератора с обмоткой возбуждения (M_{afI} и M_{afII}), изменяясь в пределах одного знака, по отношению друг к другу, имеют разные знаки.

Если рассматривать обмотку якоря как однофазную, то ее взаимная индуктивность с обмоткой возбуждения M_{af} (рис. 7, пунктирная кривая) будет иметь знакопеременный характер, изменяющаяся от минимального значения M_{af}^{min} до максимального M_{af}^{max}. При данной схеме активной зоны такое изменение взаимной индуктивности характерно для машин коммутаторного типа. Учитывая, что собственная индуктивность любой обмотки есть величина только одного знака, собственная индуктивность обмотки якоря L_a коммутаторного генератора, выражающая сумму собственных индуктивностей ее частей L_{aI} и L_{aII}, является величиной постоянной и независящей от углового положения ротора (рис. 8, пунктирная линия). Характер изменения собственной индуктивности обмотки возбуждения L_f, по причине полной сходства процессов, влияющих на ее изменение, аналогичен.

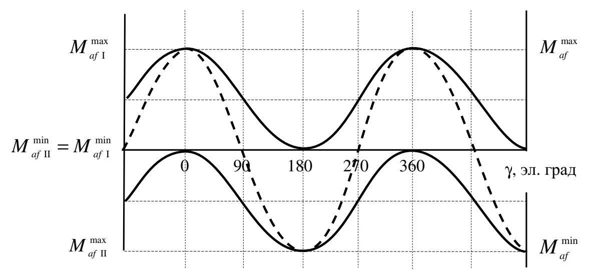


Рис. 7. *Изменение взаимных индуктивностей частей обмоток якоря и обмотки возбуждения в зависимости от угла поворота ротора*

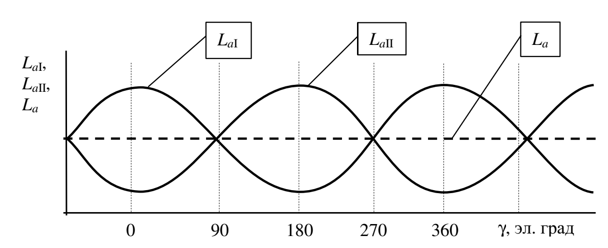


Рис. 8. *Изменение собственных индуктивностей: частей обмотки якоря L_{aI}, L_{aII} и полной обмотки якоря L_a в зависимости от угла поворота ротора*

Заключение

Представленная конструкция бесконтактного многополюсного генератора, используя свойства коммутаторных генераторов – переключение потока, сохраняет основное достоинство генераторов индукторного типа – их многополюсность. Применение многополюсного генератора позволит создавать безредукторную схему ВЭУ, что совместно с бесконтактностью генератора электромагнитного возбуждения повысит КПД и надежность работы ВЭУ. Упрощение технологии изготовления активной части генератора позволяет снизить его стоимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф., Попов С.П., Петров Н.А. Малая энергетика Севера. Проблемы и пути развития. – Новосибирск: Наука, 2002. – 188 с.
2. Сафьянников И.А., Россамахин И.Н. Проблемы развития малой энергетики Западной Сибири // Современные техника и технологии: Матер. IX Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – Т. 1. – С. 242–243.
3. Шевченко А.Ф. Многополюсные магнитоэлектрические генераторы с дробным однозубцовыми обмотками // Электротехника. – 1997. – № 9. – С. 13–16.
4. Данилевич Я.Б., Коченев А.В. Синхронный генератор небольшой мощности с постоянными магнитами // Электричество. – 1996. – № 4. – С. 27–29.
5. Афанасьев А.А., Николаев А.В. Математическая модель электрогенератора с постоянными магнитами для ветроустановки // Вестник Уральского государственного технического университета. – 2003. – № 5, ч. 2.– С. 32–35.
6. Литвинов Б.В. Однофазный синхронный генератор двойного вращения с возбуждением от постоянных магнитов высоких энергий // Электротехника. – 1998. – № 4. – С. 20–25.
7. Бут Д.А. Модификации коммутаторных генераторов повышенного напряжения // Электричество. – 1982. – № 3. – С. 31–35.
8. Патент 2230421 РФ. МПК[7] H02K 19/24. Коммутаторный генератор / И.А. Сафьянников, И.Н. Россамахин. Опубл. 10 июня 2004.

УДК 378.016